

Tabu 탐색법과 신경회로망을 이용한 SVC용 적응 퍼지제어기의 설계

손 중훈 · 황 기현 · 김 형수 · 문 경준 · 박 준호
부산대학교 전기공학과

Design of Adaptive Fuzzy Logic Controller using Tabu search and Neural Network

Jong-Hoon Son · Gi-Hyun Hwang · Hyung-Su Kim · Kyung-Jun Mun · June Ho Park
Department of Electrical Engineering, Pusan National University

Abstract - This paper proposes the design of SVC adaptive fuzzy logic controller(AFLC) using Tabu search and neural network. We tuned the gain of input-output variables of fuzzy logic controller and weights of neural network using Tabu search. Neural network used to tune the output gain of FLC adaptively. We have weights of neural network learned using back propagation algorithm.

We performed the nonlinear simulation on an single-machine infinite system to prove the efficiency of the proposed method. The proposed AFLC showed the better performance than PD controller in terms of the settling time and damping effect, for power system operation condition.

1. 서 론

전력수요의 지속적인 증가에 따른 발전 설비 및 송·배전설비의 신규 건설이 필요하지만, 전력수송설비의 신·증설은 환경 및 경제적인 측면에서 많은 제약조건을 가지고 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해서 기존설비의 이용률을 극대화하고 신규 건설없이 송전용량을 증대시키는 유연송전시스템(Flexible AC Transmission System:FACTS)이 주목받고 있다[1,2].

FACTS의 한 분야인 SVC는 전압 및 무효전력 제어가 가능하고, SVC의 입력으로 발전기 각속도를 사용함으로써 전압뿐만 아니라 저주파 진동에 대해서 충분한 댐핑도 제공할 수 있다. 종래의 SVC의 제어에 관한 연구로서는 선형 모델을 이용한 비례-적분 제어기[3], 진·지상 보상기[4] 및 H_∞ 제어기[5] 등이 제안되었다. 그러나, 이러한 제어기들은 선형화된 전력계통모델 이용하여 설계되기 때문에 많은 특성을 가진 전력계통에서는 최적의 제어 성능을 얻을 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근에는 SVC 제어기로 퍼지제어기와 신경회로망 등과 같은 지능제어방법에 대한 연구가 진행되고 있다[6].

본 논문에서는 경험적인 탐색알고리즘인 Tabu 탐색법을 이용하여 SVC용 적응 퍼지제어기를 설계하였다. Tabu 탐색법을 이용하여 SVC용 퍼지제어기의 입·출력 변수 이득과 신경회로망의 가중치를 튜닝하였다. Tabu 탐색법으로 튜닝된 퍼지제어기는 모든 계통 운전조건에 대해서 최적의 성능을 발휘할 수 없다. 따라서, 모든 계통 운전조건에 대해서 최적의 퍼지제어기를 얻기 위해서 실시간으로 퍼지제어기의 이득을 신경회로망에 이용하여 적응적으로 변경하였다.

2. 발전기 모델링 및 SVC의 구조

2.1 발전기 모델링

SVC 제어기의 설계에 사용된 1기 무한대 계통(Single-machine Infinite System)에 대한 발전기의 미분방정식은 식 (1) ~ 식 (4)와 같고, 사용한 표기법에 대한 설명은 참고문헌[7]에 있다.

$$\frac{dE_q'}{dt} = -\frac{1}{T_{do}} [E_q' + (X_d - X_d')I_d - E_{fd}] \quad (1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_{ref} \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_{ref}}{2H} [T_M - E_q' I_q - (X_q - X_q') I_d I_q] \quad (3)$$

$$\frac{dE_{fd}}{dt} = \frac{K_A}{T_A} (V_{ref} - V_t + V_s) - \frac{1}{T_A} E_{fd} \quad (4)$$

2.2 SVC의 구조

SVC 중 TCR(Thyristor Controlled Reactor) 방식은 가변용량의 무효전력을 발생시키는 방법 중 가장 많이 사용되는 장치로, 역병렬로 연결된 다이리스터 스위치를 이용하여 리액터에 걸리는 전압을 조정하여 무효전력을 연속적으로 변화시키는 방식이다. 다이리스터 소자를 Shunt Reactor에 직렬로 연결한 형태이며, 3상에 대하여 보통 Δ결선으로 구성되어 있다. FC(Fixed Capacitor)는 TCR과 조합하여 많이 사용되며, 고조파 필터로 동작하도록 설계된다. 본 논문에서 사용된 SVC 구조는 일반적으로 가장 많이 사용되는 TCR-FC형태를 사용하였으며, 일반화된 모델[1]을 사용 하였다.

3.Tabu 탐색법과 신경회로망을 이용한 SVC용 적응 퍼지제어기 설계

3.1Tabu 탐색법을 이용한 SVC용 퍼지제어기 설계

Tabu 탐색법은 경험적인 탐색 알고리즘으로써 다른 알고리즘에 비해 빠른 탐색능력을 가지고 있다. Tabu 탐색법은 강화과정과 다양화 과정으로 구성되어 있으며 Tabu 탐색법을 이용하여 SVC용 퍼지제어기의 입·출력 이득과 신경회로망의 가중치를 학습하기 위한 전체구성도는 그림 1과 같다. 그림 1에서 보는 것처럼 SVC용 퍼지제어기의 입력으로 발전기 오차와 오차의 변화분을 사용하였다. 그리고 Tabu 탐색법을 이용하여 신경회로망의 가중치를 학습하였고, 이 가중치는 실시간으로 신경회로망의 가중치를 학습할 때에 초기 가중치로 사용된다. 그림 2는 본 논문에서 사용한 SVC 모델을 나타내었다.

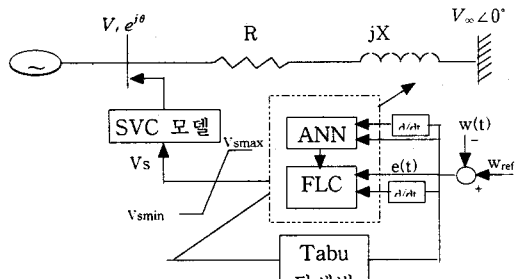


그림 1 SVC용 퍼제어기의 입·출력 이득과 신경회로망의 가중치를 학습하기 위한 전체 구성도

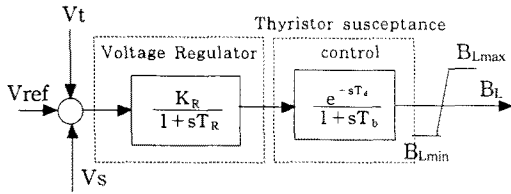


그림 2 SVC 모델

3.2 역전파 학습알고리즘에 의한 SVC용 적응 퍼지 제어기의 설계

Tabu 탐색법으로 튜닝한 퍼지 제어기는 좋은 제어 성능을 얻을 수 있지만, 전력계통은 많은 비선형성과 다양한 계통운전 조건이 존재하므로 이러한 다양한 계통 운전조건에 대해서 최적의 제어 성능을 얻을 수가 없다. 따라서, 본 논문에서는 Tabu 탐색법으로 튜닝한 퍼지 제어기의 입·출력 이득을 역전파 학습알고리즘을 이용하여 매 샘플링 시간마다 가중치를 개선한 적응 퍼지 제어기를 제안하였고, 구조는 그림 3에 나타내었다. 이때 역전파 학습알고리즘을 이용하여 가중치를 학습할 때 신경회로망의 초기 가중치는 Tabu 탐색법으로 학습한 결과를 이용하였다.

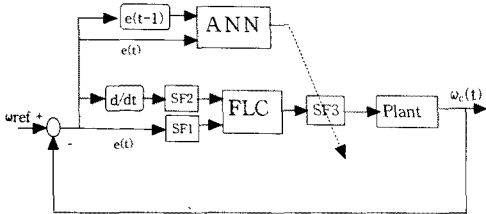


그림 3 신경회로망을 이용한 적응 퍼지제어기의 구조

4. 사례 연구

제한한 SVC용 적응 퍼지제어기의 성능을 검증하기 위하여 그림 4의 1기 무한대 계통에 대해 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 비선형 시뮬레이션에 사용된 Tabu 탐색법의 시뮬레이션 계수는 표 1과 같다. 표 1과 같은 조건에서 Tabu 탐색법으로 SVC용 적응 퍼지제어기를 튜닝하였고, 튜닝된 SVC용 적응 퍼지제어기의 입·출력변수의 이득은 각각 0.24, 3.50, 2.70이다. 그림 5는 매 반복횟수마다 목적함수의 수렴특성을 나타내었다.

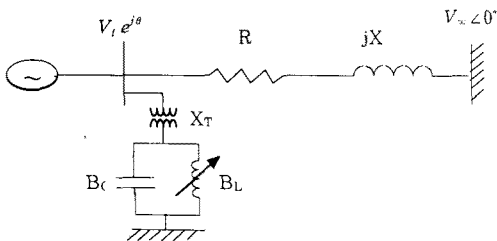


그림 4 성능평가에 사용된 1기 무한대 계통

표 1 Tabu 탐색법의 시뮬레이션 계수

적용방법	이웃해의 수	Tabu List 수	반복횟수
Tabu 탐색법	50	5	200

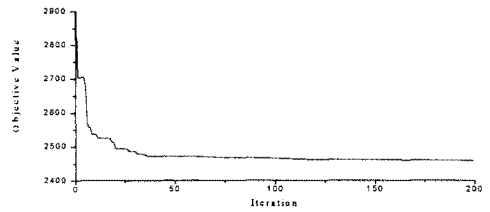


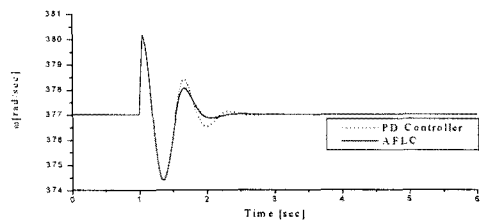
그림 5 반복횟수에 따른 목적함수의 수렴특성

Tabu 탐색법에 의해서 최적화된 SVC용 퍼지제어기와 PD제어기와의 제어성능을 비교하기 위해 사용된 해석조건은 표 2와 같고, 경우-1은 SVC용 퍼지제어기 튜닝시 사용된 계통운전 조건이고, 경우-2~경우-6은 SVC용 퍼지제어기와 PD제어기의 강인성을 평가하기 위해 사용되었다.

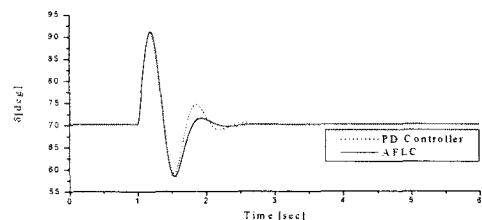
표 2 제어기 성능평가에 사용된 시뮬레이션 조건

시뮬레이션 사례	동작 조건	외란 종류	고장시간
경우-1	정상부하시 ($P_e=1.0$ $Q_c=0$)	3상 지락 고장	50[msec]
경우-2		T_m 이 0.05[pu] 증	-
경우-2		T_m 이 0.10[pu] 증	-
경우-2		T_m 이 0.15[pu] 증	-

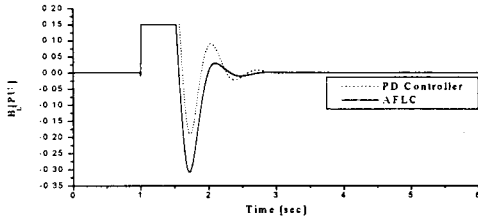
그림 6는 Tabu 탐색법 이용하여 SVC용 퍼지제어기의 튜닝에 사용된 표 2의 경우-1에 대해서 PD 제어기와 제안한 SVC용 적응 퍼지제어기가 있는 경우에 대해 발전기 각속도, 발전기 위상각 및 선로에 투입되는 리액턴스를 나타내었다. 그림 6에서 보는 것처럼 제안한 SVC용 적응 퍼지제어기가 정정시간과 계통 효과면에서 PD 제어기보다 더 나은 제어 성능을 나타낼 수 있다. 그림 7 ~ 그림 9는 SVC용 적응 퍼지제어기의 강인성을 평가하기 위해 표 2의 경우-2 ~ 경우 4에 대해서 PD 제어기 및 제안한 SVC용 적응 퍼지제어기가 있는 경우에 대해 발전기 응답특성을 나타내었다. 그림 7 ~ 그림 9에서 보는 것처럼 제안한 SVC용 적응 퍼지제어기가 정정시간과 계통 효과면에서 PD 제어기보다 더 나은 제어 성능을 나타내었다.



(a) 발전기 각속도

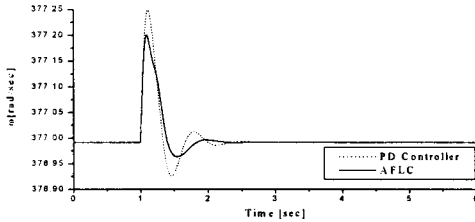


(b) 발전기 위상각

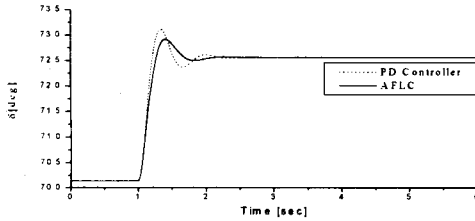


(c) 선로에 투입되는 리액턴스 량

그림 6 정상부하시 경우-1에 대한 발전기 응답

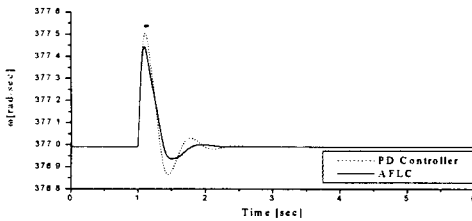


(a) 발전기 각속도

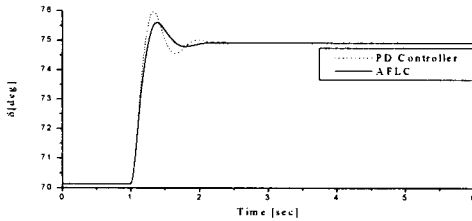


(b) 발전기 위상각

그림 7 정상부하시 경우-2에 대한 발전기 응답

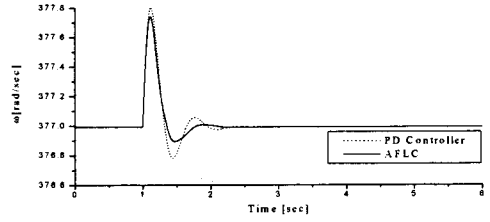


(a) 발전기 각속도

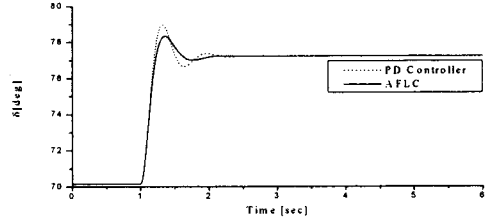


(b) 발전기 위상각

그림 8 정상부하시 경우-3에 대한 발전기 응답



(a) 발전기 각속도



(b) 발전기 위상각

그림 9 정상부하시 경우-4에 대한 발전기 응답

5. 결 론

본 논문에서는 경험적인 탐색알고리즘인 Tabu 탐색법을 이용하여 SVC용 적응 퍼지제어기를 설계하였다. Tabu 탐색법을 이용하여 SVC용 퍼지제어기의 입·출력 변수 이득과 신경회로망의 가중치를 튜닝하였다. Tabu 탐색법으로 튜닝된 퍼지제어기는 모든 계통 운전 조건에 대해서 최적의 성능을 발휘할 수 없다. 따라서, 모든 계통 운전 조건에 대해서 최적의 퍼지제어기를 얻기 위해서 실시간으로 퍼지제어기의 이득을 신경회로망을 이용하여 적응적으로 변경하였다.

제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 1기 무한대 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 비선형 시뮬레이션에 해본 결과, 적응 퍼지제어기의 설계에 사용된 정상부하시 3상 지락 고장 및 강인성 평가에 사용된 기계적인 토오크 변화에 대해 제안한 적응 퍼지제어기가 PD 제어기보다 더 나은 제동 효과를 나타내었다.

(참 고 문 헌)

- [1] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS, Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", IEEE, 2000
- [2] "FACTS Application", IEEE Power Engineering Society, IEEE Catalog No. 96TP, 1996
- [3] C. S. Chen and C. T. Hsu, "The Simplified Linear Model Derivation of Power Systems with Static Var Compensators to Improve System Damping", IEEE/KTH Stockholm Power Tech. Conference, pp. 370-375, June, 1995
- [4] M. Nayezyadeh and A. R. Messina, "Advanced Concepts of Analysing Static Var Compensators to Damp Inter-Area Oscillation Modes", ETEP, Vol. 9, No. 3, pp. 159-165, May, 1999
- [5] Q. Zhao and J. Jiang, "Robust SVC Controller Design for Improving Power System Damping", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 4, pp. 1927-1932, Nov, 1995
- [6] P. K. Dash, A. Routray, P. C. Panda, and S. K. Panda, "Adaptive Fuzzy Logic Control of a Static Var System", ETEP, pp. 128-133, May, 1998